



冯 洁, 丁 湘, 蒲治国, 等. 陕北侏罗系砂岩宏观-微观特征及其富水性响应机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 167-178.
FENG Jie, DING Xiang, PU Zhiguo, *et al.* Responding mechanism of macro-micro characteristics and water abundance on Jurassic sandstone in Northern Shaanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 167-178.

陕北侏罗系砂岩宏观-微观特征及其富水性响应机制

冯 洁^{1,2}, 丁 湘¹, 蒲治国¹, 李兆扬¹, 段东伟¹, 段会军³

(1. 中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054; 2. 三秦学者“矿山地质学”创新团队, 陕西 西安 710065;
3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 砂岩含水层富水性是矿井防治水的基础, 随着陕北侏罗纪煤田煤炭资源逐步开发, 侏罗系砂岩含水层富水性研究对保障矿井安全高效开采意义重大, 但其非均质性如何影响富水性, 即影响机制尚不明确。以大海则煤矿为研究区, 通过沉积相划分与 38 块典型岩样铸体薄片图像分析、压汞、核磁共振等实验室测试, 结合钻孔抽水试验成果, 研究侏罗系直罗组、延安组沉积相、微观孔隙结构及其与富水性之间的关系, 揭示了砂岩微观孔隙结构与富水性的响应机制。研究表明: 大海则煤矿直罗组下段主要发育河流沉积体系河流砂坝和河漫滩沉积微相, 延安组三段主要发育三角洲沉积体系分流河道和分流间湾沉积微相, 河流沉积体系普遍较三角洲沉积体系含水层富水性强, 以粗砂岩、中砂岩为主的河道砂坝富水性相较于中砂岩、细砂岩为主的河漫滩富水性强, 砂岩厚度、砂地比较大的分流河道较砂岩厚度、砂地比较小的分流间湾富水性大; 根据砂岩物性、孔隙分布、连通性等将侏罗系砂岩微观孔隙结构划分为大孔粗喉型(I类)、中孔-中-细喉型(II类)、小孔细喉型(III类)、小-微孔-微细喉型(IV类)4 种类型, 孔隙结构由 I 类到 IV 类依次变差, 富水性依次变弱; 砂岩宏观沉积相与微观孔隙结构共同表征含水层富水程度。研究结果为砂岩含水层特征研究及其富水性科学预测提供了一种新思路, 为矿井防治水提供了理论依据。

关键词: 侏罗系砂岩; 沉积相; 微观孔隙结构; 富水性; 钻孔单位涌水量; 防治水

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)07-0167-12

Responding mechanism of macro-micro characteristics and water abundance on Jurassic sandstone in Northern Shaanxi Province

FENG Jie^{1,2}, DING Xiang¹, PU Zhiguo¹, LI Zhaoyang¹, DUAN Dongwei¹, DUAN Huijun³

(1. China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Innovation Team of "Mining Geology" for Sanqin Scholar, Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: The water abundance of sandstone aquifer is the basis of mine water prevention and control. With the gradual development of the Jurassic coal resources in northern Shaanxi areas, the study of water abundance of Jurassic sandstone aquifer is of great significance to ensure safe and efficient mining. However, how its heterogeneity affects water abundance, that is the influence mechanism is still unclear. Taking Dahaize Coal Mine as the research area, through the division of sedimentary facies and 38 typical sandstone samples casting thin section image analysis, mercury injection, nuclear magnetic resonance and so on laboratory tests, combined with the results of borehole pumping test, the sedimentary facies, micro pore structure and its relationship with water abundance of Jurassic Zhiluo Formation and Yan'an Formation were studied. The response mechanism of sandstone microscopic pore structure on water abundance is revealed. The results show that the lower Zhiluo Formation in Dahaize Coal Mine mainly develops river sand dam and flood plain sedimentary microfacies of river sedimentary system; The third section of Yan'an Formation mainly develops distributary channel and interdistributary bay sedimentary microfacies of delta sedimentary system. The river sedimentary system is generally more water abundance than the aquifer of delta

收稿日期: 2023-03-20 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0367

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41472234); 陕西省青年科技新星资助项目(2021KJXX-82)

作者简介: 冯 洁(1986—), 女, 陕西西子人, 高级工程师, 博士。Tel: 029-87870141, E-mail: fengjie0215@126.com

sedimentary system. The water abundance of channel sand dam dominated by coarse sandstone and medium sandstone is stronger than that of flood plain dominated by medium sandstone and fine sandstone. The water abundance of distributary channel with large sandstone thickness and sand ratio is larger than that of interdistributary bay with small sandstone thickness and sand ratio. The microscopic pore structure could be divided into four types by physical properties, lithology, pore distribution, connectivity, which are type I for large pore and coarse throat, type II for mesopore and middle-fine throat, type III for keyhole and fine throat, type IV for small- microporous and micro-fine throat, and the pore structure becomes worse and the water abundance becomes weaker from I to IV. The macroscopic sedimentary facies and microscopic pore structure of the sandstone jointly characterize the water abundance of aquifer. It provides a new idea for the characteristics and scientific prediction of water abundance of sandstone aquifer, and provides theoretical basis for mine water control.

Key words: Jurassic sandstone; sedimentary facies; microscopic pore structure; water abundance; units-inflow of drilling; water prevention

0 引言

我国西部煤炭资源占全国煤炭资源总量的70%以上^[1],其中90%以上为侏罗系煤层,担负着我国基础能源自主供给的核心角色。随着国家“一带一路”战略的实施与煤炭开发加速西移^[2],陕北侏罗纪煤田煤炭开发强度逐年加大,煤层顶板砂岩水害问题日益凸显,实际矿井涌水量与预计值相差甚远,顶板砂岩水疏放目标靶区难以科学获取。陕北侏罗系砂岩含水层非均质性、富水性等方面尚需深入系统的研究,砂岩非均质性^[3-4]及其与富水性的关系将是未来应给予重点关注的的关键性问题。

近些年,针对砂岩含水层富水性不均一的问题,众多学者从沉积学角度研究砂体与富水性的关系,指导砂岩含水层富水性评价与矿井水害防治。武强^[5-6]、侯恩科^[7]、代革联^[8]、曾一凡^[9]、王洋等^[10]、郭小铭等^[11]构建了含有砂泥质量比、含水层厚度、构造等指标的含水层富水性评价模型,研究了不同地质条件下煤层顶板含水层的富水性。岩体微观孔隙结构的研究成果多集中于油气领域致密储层孔喉特征,主要研究方法有扫描电镜^[12]、薄片鉴定^[13-14]、压汞法^[15-17]、核磁共振法^[18-20]、铸体薄片^[21]、微米/纳米CT法^[22]、低温氮吸附法^[23]等,通过系统研究油气生产动态规律,为油气生产提供科学依据。笔者采取陕北侏罗纪煤田榆神府矿区侏罗系不同岩性砂岩样品,采用压汞法、铸体薄片图像分析、核磁共振法等方法划分了砂岩微观孔隙结构类型,系统研究了微观孔隙结构对含水层富水性的影响,提出了4种沉积控水模式^[24-25],为含水层富水性的研究提供了一种新思路。陕北侏罗纪煤田煤层顶板上覆非均质砂岩孔隙裂隙含水层,沉积相变频繁,富水性极不均一,矿井涌水量大,砂岩沉积相、微观孔隙结构特征及其与富水性的关系是必须首先研究的关键问题,也是顶板水疏放与矿井防治水的基础。因此,以大海则

煤矿侏罗系砂岩为例,在划分侏罗系砂岩沉积相的基础上,通过开展铸体薄片图像分析、压汞、核磁共振等试验测试,研究直罗组、延安组砂岩沉积相、微观孔隙结构及其与富水性的关系。

1 研究区概况

大海则井田属于陕北侏罗纪煤田,位于陕西省榆林市西北约30 km,是中煤集团重点建设的蒙陕亿吨级煤炭基地的主力矿井之一,面积265.66 km²,设计产能15.0 Mt/a。研究区处于毛乌素沙漠南缘,地表以沙漠滩地及半固定沙丘地貌为主,地形总体表现为东北高、西南低的特征,最大相对高差127.3 m。区内地层由老至新有三叠系上统瓦窑堡组(T_{3w}),侏罗系下统富县组(J_{1f}),侏罗系中统延安组(J_{2y})、直罗组(J_{2z})、安定组(J_{2a}),白垩系下统洛河组(K_{1l})及新近系静乐组(N_j)和第四系(Q)(图1)。含煤地层为延安组,主要可采煤层为2号煤和3号煤。地层总体上向西微倾伏,局部发育宽缓的波状起伏,地层倾角约1°,构造简单。

该区属于干旱温带高原大陆性气候,日照丰富,干燥少雨,据榆林气象站多年资料,研究区最高气温36.7℃,最低气温-29.7℃,年降水量279~541 mm,年蒸发量1720~2085 mm。

研究区无地表河流,水文地质单元分区属鄂尔多斯高原区,高原碎屑岩类孔隙裂隙水亚区。含水层自上而下依次为第四系松散孔隙含水层(Q)、白垩系下统洛河组孔隙裂隙含水层(K_{1l})、侏罗系中统安定组(J_{2a})、直罗组(J_{2z})、延安组(J_{2y})孔隙裂隙含水层、下统富县组孔隙裂隙含水层(J_{1f})、三叠系上统瓦窑堡组孔隙裂隙含水层(T_{3w})组成(图1、表1),其中,延安组三段与直罗组下段富水性较强。隔水层主要为新近系静乐组局部隔水层和白垩系及以下岩层中泥岩、粉砂岩隔水层,前者主要为红色黏土,后者以粉砂岩、泥岩为主,孔隙率小,胶结致密,隔水性较好。

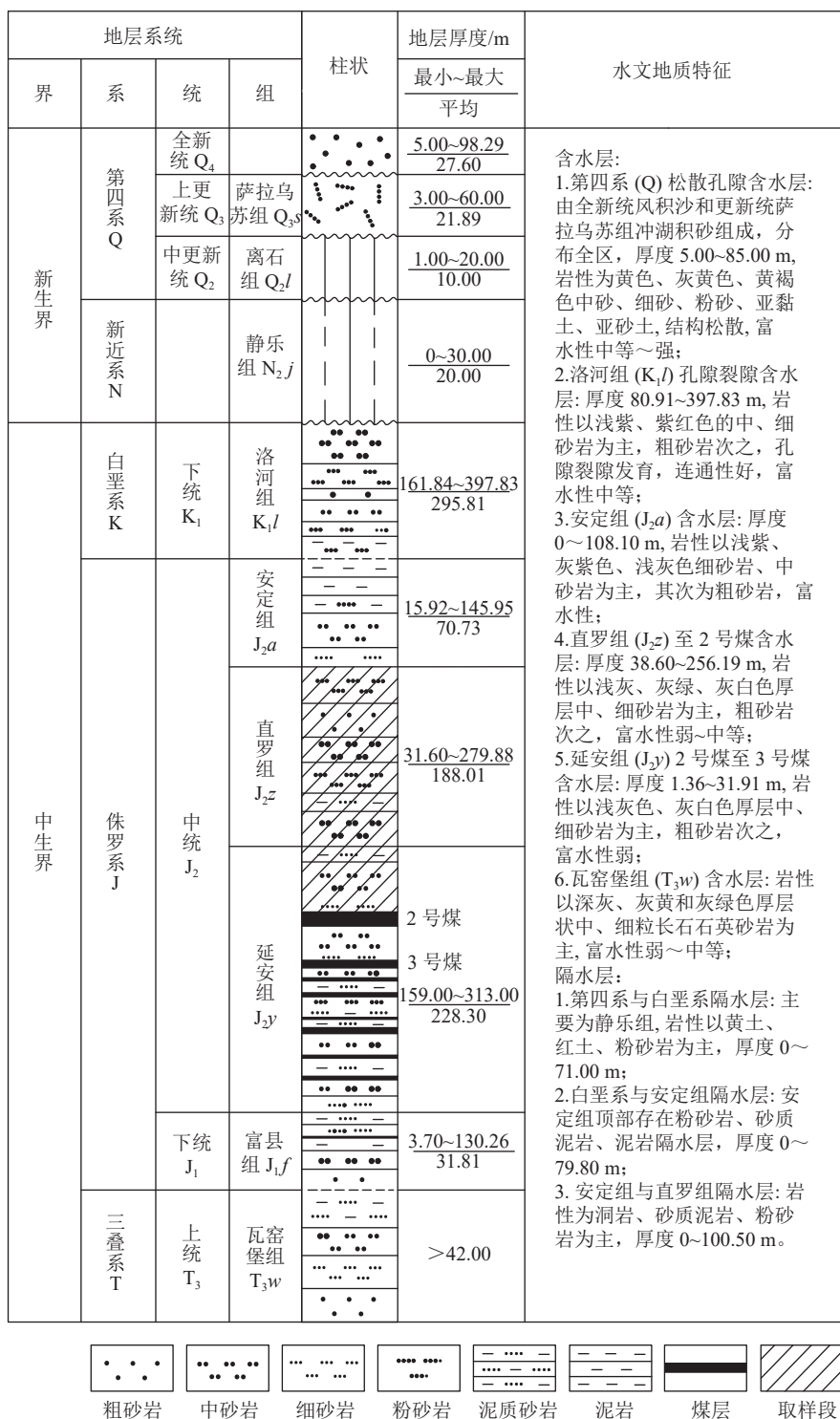


图 1 研究区水文地质综合柱状图

Fig.1 Hydrogeological comprehensive histogram of the study area

2 侏罗系地层沉积相特征

沉积相是沉积物的生成环境、生成条件和其特征的总和, 反映古代原始沉积环境特征, 不同沉积环境具有独特物理、化学和生物特征的沉积岩(物), 沉积环境控制和影响着地球水圈水的分布和流态性能, 地层岩石颜色、结构、构造及测井相等标志控制沉积

砂体类型、形成不同沉积相, 表现出不同的富水特征。

2.1 沉积相划分标志

1) 岩石颜色。研究区侏罗系直罗组地层岩石以灰绿色、紫红色为主(图 2a), 延安组主要为灰白色、灰色(图 2b), 代表一种半氧化、半还原的环境。

表1 研究区含水层划分及其参数

Table 1 Aquifer division and its parameters in the study area

含水层	厚度/m	水位埋深/m	单位涌水量/ (L·s ⁻¹ ·m ⁻¹)	渗透系数/(m·d ⁻¹)	矿化度/(mg·L ⁻¹)	水化学类型	
第四系 全新统风积沙和上更新 统萨拉乌苏组含水层	5.00~85.00	1.70~8.43	0.1290~1.0900	0.479~8.420	231.00~391.47	HCO ₃ -Ca	
白垩系 下统洛河组含水层	80.91~397.83	2.45~11.20	0.1430~0.4660	0.066~0.187	0.20~413.00	HCO ₃ -Na-Ca、HCO ₃ -Ca-Na	
侏罗系	中统安定组含水层	0~108.10	10.32~25.43	0.0030~0.0200	0.009~0.044	398.00~916.00	HCO ₃ ·SO ₄ -Na-Ca
	中统直罗组至延安 组2煤顶含水层	38.60~256.19	18.29~41.06	0.0330~0.2710	0.067~0.453	2017.00~3265.00	SO ₄ -Na-Ca
	中统延安组2煤至3煤含水层	1.36~31.91	26.16~53.22	0.0004~0.0120	0.001~0.022	1063.00~5819.00	SO ₄ -Na-Ca
三叠系 上统瓦窑堡组含水层	—	—	0.0170~0.1105	0.018~0.089	—	SO ₄ -Na-Ca、Cl-Na-Ca	



图2 研究区侏罗系地层岩心

Fig.2 Jurassic strata core in the study area

2) 岩石类型及其组合。研究区直罗组下段地层主要由灰绿色、青灰色中-粗粒长石砂岩(即“七里镇砂岩”)、局部夹粉砂岩、砂质泥岩组成;上段由灰绿色细粒长石砂岩(即“高桥砂岩”)、灰绿或黄绿色粉砂岩、砂泥岩互层组成。以上岩石组合特征预示其形成环境经历了湖泊三角洲向河流沉积的转变。延安组主要由浅灰色、灰白色各粒级长石砂岩,灰色、深灰色砂质泥岩、泥岩和煤层组成,反映其形成于河流和湖泊三角洲泥炭沼泽沉积环境。

3) 岩石结构与构造。研究区直罗组下部以中-粗砂岩为主,次棱角状,钙泥质胶结,分选较差,反映了沉积环境水动力较强。延安组岩石呈现细砂状结构,主要成分为长石、石英类碎屑,少量岩屑、方解石等,岩石中碎屑成分磨圆度较低,分选中等,整体成熟度较低,孔隙主要为粒间溶孔、粒间孔、长石溶孔等,反映出沉积环境水动力较直罗组弱。

通过观察岩心,直罗组砂岩发育多种层面和层理构造,冲刷构造主要发育在直罗组底部砂岩及其与延安组的接触面上;在粉砂岩和泥岩中常发育沙纹层理,这种层理主要出现在河流的上部边滩及洪泛平原;常见的板状、槽状和波状交错层理反映了与河道相关的沉积环境。

4) 测井相标志。通过分析研究区侏罗系地层测井曲线,认为直罗组下部测井曲线普遍表现为柱形箱状或锯齿状、中上部为漏斗型锯齿状、钟型锯齿状、

卵形锯齿状,延安组三段测井曲线表现为漏斗型锯齿状、钟型锯齿状。不同形态的自然伽马和自然电位曲线反映出沉积物粒径的大小,间接地反映水动力的强弱。

2.2 沉积相划分及特征

利用研究区直罗组与延安组地层中期基准面旋回中的砂地比、岩石颜色、岩石结构、岩石构造及测井相等标志,结合地层厚度、砂层厚度、沉积基底特征及单井、连井的沉积微相展布,编绘研究区直罗组下段和延安组三段的沉积微相展布图(图3、图4)。

由图3可知,直罗组下段主体为曲流河沉积,亚相有河床亚相、河漫亚相和堤岸亚相,对应的微相分别为河道砂坝微相、河漫滩微相和天然堤微相。本段底部常发育一段辫状河相河道砂坝微相砂体。区内共发育北西-南东向展布的6条河道,主要发育于ZK40-17、ZK40-14、ZK40-12、ZK38-12、ZK36-8钻孔沿线,ZK40-21、ZK35-16、ZK31-12钻孔、ZK27-9钻孔沿线等,河道中心沉积物的砂地

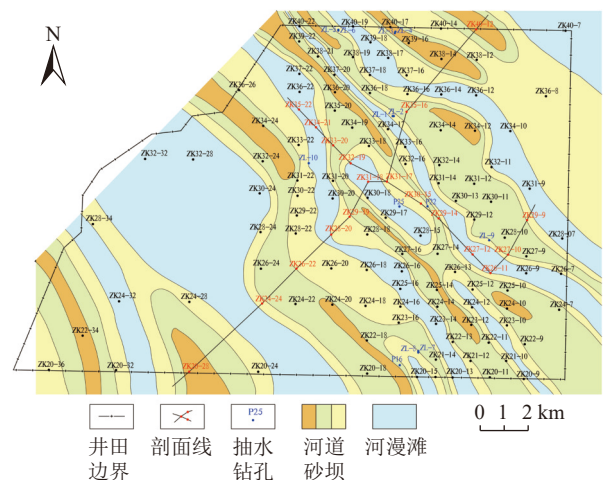


图3 大海则井田直罗组下段沉积相展布

Fig.3 Sedimentary facies distribution of lower Zhiluo Formation in Dahanze Mine Field

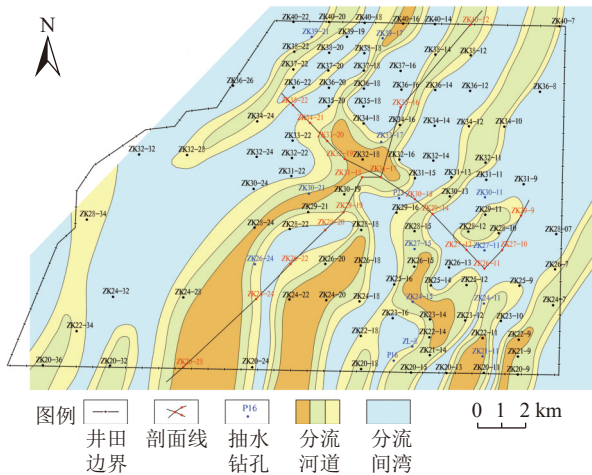


图 4 大海则井田延安组三段沉积相展布

Fig.4 Sedimentary facies distribution of three sections of Yan'an formation in Dahaize Mine Field

比为 40%~60%。河漫滩微相不发育,沉积物的砂地比小于 20%。

由图 4 可知,延安组三段主体为三角洲平原沉积,其上发育曲流河沉积。延安组三段发育 3 条北东—南西向河道,沉积微相以分流河道、分流间湾、沼泽为主。分流河道主要分布于 ZK28—34 钻孔、ZK20—36 钻孔一线, ZK40—16 钻孔、ZK32—18 钻孔、ZK28—24 钻孔、ZK20—28 钻孔、ZK24—22 钻孔一线等,中部河道砂体发育,规模较大,砂地比在 40%~50%;在 3 条分流河道之间发育着分流间湾沉积,其砂地比小于 30%。

综上,大海则煤矿直罗组下段主要为河流沉积体系,辫状河和曲流河沉积亚相,河流砂坝和河漫滩沉积微相;延安组三段主要为三角洲沉积体系,三角洲平原沉积亚相,分流河道和分流间湾沉积微相。与众多学者对该区直罗组、延安组沉积相研究成果相符,以往沉积相划分结果显示,大海则所处的鄂尔多斯盆地东北部直罗组主要发育河流沉积体系,延安组主要发育三角洲沉积体系。

3 侏罗系砂岩微观孔隙结构特征

岩石的孔隙结构是指岩石内部的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系(图 5)。孔隙是孔隙系统中的膨大部分,决定了孔隙率大小,喉道是孔隙系统中的细小部分,决定了岩层水的储存能力和渗透特征。连通孔隙率是渗透率的一个主要贡献参数,复杂储层中普遍存在孔隙率相近而渗透率差异较大的现象,李雄炎等^[26]研究了相近孔隙率条件下,不同类型岩石渗透率变化,构建了孔隙率指

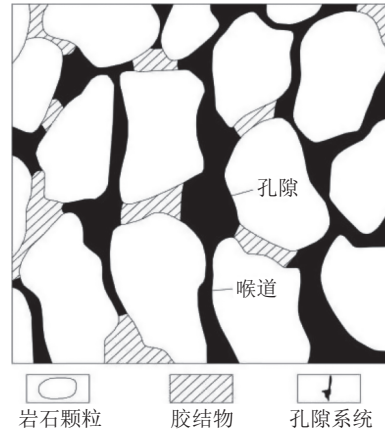


图 5 岩石孔隙结构示意图

Fig.5 Schematic of the pore structure for rock

数模型,获得孔隙率指数的分布范围。

微观孔隙结构测试在 大海则煤矿采集 38 块不同岩性岩样,其中直罗组 10 块、延安组 28 块,运用铸体薄片图像分析、压汞、核磁共振等技术研究岩样孔隙结构特征。铸体薄片图像分析采用 JS-4 型岩石孔隙铸体仪按照 SY/T 6103—2004《岩石孔隙结构特征的测定图像分析法》中的要求对岩石孔隙结构特征进行测定及分析,分析系统为西图粒度图像分析系统,压汞选用 YG-97A 型电容式压汞仪,核磁共振采用 Oxford-MARAN DRX 2 型核磁共振仪按照 SY/T 6490—2014《岩样核磁共振参数实验室测量规范》进行测试。

3.1 岩石学特征

1)碎屑组分及特征。研究区直罗组、延安组地层岩石铸体薄片鉴定结果(表 2)显示,直罗组岩石类型主要有长石粗砂岩、岩屑石英细砂岩、长石细砂岩、含泥质粉砂质长石细砂岩,其中,粗粒砂岩占比为 33.3%,细粒砂岩占比为 40.0%;延安组岩石类型主要有长石细砂岩、长石石英细砂岩、岩屑石英细砂岩、泥质粉砂岩、粉砂岩,其中,细粒砂岩占比为 53.6%,粉粒砂岩占比为 21.4%。直罗组、延安组地层石英、长石类碎屑岩平均含量分别为 38.25%、37.15%,二者含量相差不大,直罗组较延安组稍高,而岩屑、其他碎屑、杂基、胶结物等组分含量延安组地层较直罗组地层高。

2)岩石结构特征。研究区直罗组地层岩石以粗砂、细砂为主,主要粒径 0.01~0.76 mm,颗粒分选差—中等,次棱角—棱角状磨圆,胶结类型主要为孔隙式胶结,样品数占直罗组总样品数的 77.8%,颗粒之间主要为点接触、少量点—线接触;延安组地层岩石以细砂、粉砂为主,主要粒径 0~0.50 mm,颗粒分

表2 不同时代地层陆源碎屑组分及含量

Table 2 Statistics of terrigenous detrital composition and content in formation of different ages

%

地层	最大~最小(平均)		岩屑	其他碎屑	杂基	胶结物
	石英类碎屑	长石类碎屑				
直罗组	26~58(46.8)	6~50(29.7)	0~27	1~4	1~6	4~27
延安组	20~77(38.8)	10~59(35.5)	0~39	1~16	1~9	4~45

选较差—较好,次棱角—棱角磨圆,以孔隙式胶结为主,样品数占延安组总样品数的88.0%,少数基底式胶结,颗粒之间主要为点—线接触,个别点接触(表3)。

3.2 岩层物性特征

根据研究区38块岩样物性资料分析可知,直罗组孔隙率1.13%~18.10%,平均9.69%,延安组孔隙率1.81%~19.64%,平均10.06%,直罗组渗透率 $0.004 \times$

$10^{-15} \sim 41.600 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均 $7.54 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,延安组渗透率 $0.009 \times 10^{-15} \sim 132.000 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均 $7.19 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,直罗组平均孔隙率小于延安组,平均渗透率稍大于延安组,反映出孔隙率与渗透率正相关关系不明显,表明影响孔隙率、渗透率因素众多,物性并非由单一地质因素决定,需要进一步开展孔隙结构特征研究,为砂岩富水性的评价提供依据。

表3 不同时代地层岩石结构特征测试结果

Table 3 Test results of rock structure characteristics in different ages

地层	最大粒径/mm	主要粒径/mm	分选	磨圆度	胶结类型	支撑类型	接触方式
直罗组	0.20~0.88	0.01~0.76	差—中等	次棱角—棱角	孔隙式、基底式	颗粒	点、线、点—线
延安组	0.06~0.75	0.00~0.50	较差—较好	次棱角—棱角	孔隙式、基底式	颗粒	点—线、线、点

3.3 岩层孔隙结构特征

联合铸体薄片图像分析、压汞、核磁共振等测试结果,将研究区直罗组、延安组地层38块岩样孔隙结构类型划分为4种类型,分别为大孔粗喉型(I类)、中孔—中—细喉型(II类)、小孔细喉型(III类)、小—微孔—微细喉型(IV类),从I类到IV类,孔隙结构依次变差(表4),图6为直罗组与延安组典型毛管压力曲线特征及孔隙类型划分。

1)大孔粗喉型(I类):属于该种类型的岩样有3块,毛管压力曲线以缓坡状偏向图6的左下方,中间平缓段较长,排驱压力小,排驱压力0.019~0.117 MPa,平均值为0.074 MPa,平均孔喉半径1.368~4.507 μm ,中值孔喉半径0.143~4.018 μm ,平均分选系数2.320。图7为I类孔隙结构类型岩样铸体薄片图像。岩石多为粗粒、中粒砂岩,孔隙组合类型主要为粒间孔+粒间溶孔+长石溶孔,极个别发育微裂隙。具有此类孔隙结构的岩层孔渗特性一般较好,其渗透率 $27.900 \times 10^{-15} \sim 132.000 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,孔隙率6.15%~19.64%。

2)中孔—中—细喉型(II类):属于该种类型的岩样有8块,毛管压力曲线以近45°直线状相对偏向图6的左下方,排驱压力较I类孔隙结构稍大,排驱压力0.019~0.899 MPa,平均值0.208 MPa,平均孔喉半径0.082~4.616 μm ,中值孔喉半径0.772~

4.068 μm ,平均分选系数1.563,图8为II类孔隙结构岩样铸体薄片图像。岩石为粗粒、中粒、细粒砂岩,孔隙组合类型主要为粒间孔+粒间溶孔+长石溶孔,极个别发育微孔隙,图9为直罗组与延安组核磁共振典型 T_2 谱分布特征及孔隙类型划分。 T_2 谱峰的位置靠后,反映出孔径较大。具有此类孔隙结构的岩层渗透率 $1.130 \times 10^{-15} \sim 16.800 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,孔隙率1.84%~17.21%,孔渗特性相对较好。

3)小孔细喉型(III类):属于该种类型的岩样有9块,毛管压力曲线向图6右上方凸,呈斜坡型,排驱压力较I、II类显著增大,普遍大于1 MPa,平均孔喉半径与中值孔喉半径则小于I、II类孔隙结构岩样,其中平均孔喉半径0.022~0.131 μm 。图10为III类孔隙结构岩样铸体薄片图像。岩石主要为细粒砂岩,孔隙组合类型较I、II类增加了岩屑溶孔,微孔隙、微裂隙不发育; T_2 谱峰的位置较II类孔隙结构靠前,孔径较其稍小。该类孔隙结构的岩层渗透率均小于 $0.500 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均孔隙率14.03%,岩石的孔渗特性较差。

4)小—微孔—微细喉型(IV类):属于该种类型的岩样有18块,毛管压力曲线分布于图6的右上部,曲线形态呈陡坡状,排驱压力平均值高达9 MPa,平均孔喉半径与中值孔喉半径均小于0.050 μm ,图11为IV类孔隙结构岩样铸体薄片图像。岩石主要为细

表 4 研究区部分砂岩样品微观孔隙结构特征及类型划分结果

Table 4 Results of microscopic pore structure characteristics and classification for some sandstone samples in the study area

岩样 编号	试验 编号	地层	孔隙 率/%	渗透率/ 10^{-15} m^2	岩性	排驱 压力/MPa	平均孔喉 半径/ μm	中值孔喉 半径/ μm	分选 系数	核磁束缚 水饱和度/%	T_2 几何平均 (饱和)/ms	孔隙结 构分类
ZL-10	JC2021116A012	直罗组	6.15	41.600	泥质粉砂岩	0.087	2.052	1.406	1.842	—	—	I类
JY820-02b	JC2021116A044	延安组	19.64	132.000	岩屑长石中粒砂岩	0.019	4.507	4.018	3.804	—	—	I类
ZL-10	JC2021116A011	直罗组	15.06	27.900	长石粗砂岩	0.117	1.368	0.143	1.315	—	—	I类
ZL-10	JC2021116A016	直罗组	13.50	13.000	长石粗砂岩	0.087	2.012	1.401	1.510	—	—	II类
ZL-10	JC2021116A017	直罗组	11.76	8.260	长石粗砂岩	0.101	2.106	1.204	1.602	—	—	II类
ZL-10	JC2021116A029	延安组	13.54	1.130	长石细砂岩与泥质粉砂岩	0.019	4.613	3.463	3.708	—	—	II类
YS1-2(1-2)8-A	JC2021116A064	直罗组	17.21	16.500	长石细砂岩	0.053	3.384	4.068	2.410	33.3	39.4	II类
JY820-02b	JC2021116A043	延安组	14.54	16.800	石英中粒砂岩	0.137	1.378	0.825	1.101	—	—	II类
JY820-02b	JC2021116A045	延安组	17.01	3.630	长石细砂岩	0.262	0.730	0.772	0.612	—	—	II类
JY820-02b	JC2021116A047	延安组	16.12	6.940	长石中粒砂岩	0.109	1.647	1.063	1.506	—	—	II类
ZL-10	JC2021116A035	延安组	1.84	2.380	泥质粉砂岩	0.899	0.082	—	0.053	—	—	II类
ZL-10	JC2021116A015	直罗组	18.10	0.129	长石细砂岩	3.037	0.049	0.032	0.033	—	—	III类
ZL-10	JC2021116A028	延安组	8.19	0.154	长石石英细砂岩	2.778	0.041	0.020	0.030	—	—	III类
ZL-10	JC2021116A036	延安组	12.63	0.248	长石石英细砂岩	0.830	0.131	0.109	0.095	—	—	III类
YS8-4(8-2)2-B	JC2021116A066	延安组	16.68	0.240	长石细砂岩	7.027	0.031	0.031	0.015 1	74.8	4.7	III类
ZL-10	JC2021116A032	延安组	12.89	0.228	长石细砂岩	1.990	0.072	0.036	0.052	—	—	III类
ZL-10	JC2021116A037	延安组	10.26	0.134	长石石英细砂岩	1.169	0.108	0.046	0.071	—	—	III类
JY820-02b	JC2021116A040	延安组	15.55	0.417	岩屑长石中粒砂岩	1.198	0.089	0.043	0.063	—	—	III类
JY820-02b	JC2021116A041	延安组	14.16	0.327	长石细砂岩	1.666	0.090	0.052	0.059	—	—	III类
JY820-02b	JC2021116A042	延安组	17.83	0.363	岩屑长石中粒砂岩	14.777	0.022	0.021	0.009	—	—	III类
ZL-10	JC2021116A010	直罗组	7.45	0.021	含泥质粉砂长石细砂岩	11.386	0.027	0.019	0.011 7	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A013	直罗组	3.31	0.035	含泥质粉砂岩	5.939	0.037	0.018	0.018	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A021	直罗组	1.13	0.024	岩屑石英细砂岩	18.960	0.020	—	0.008	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A014	直罗组	3.97	0.038	粉砂岩	7.537	0.033	0.017	0.015	—	—	IV类
JY820-02b	JC2021116A038	延安组	3.32	0.039	长石细砂岩	7.028	0.035	0.020	0.017	—	—	IV类
JY820-02b	JC2021116A039	延安组	6.90	0.011	泥质粉砂岩	4.974	0.038	0.029	0.020	—	—	IV类
YS1-2(1-2)1-B	JC2021116A063	延安组	4.97	0.064	粉砂岩	6.363	0.030	0.020	0.015	74.4	1.5	IV类
ZL-10	JC2021116A022	延安组	1.81	0.018	岩屑石英细砂岩	22.134	0.018	—	0.007	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A024	延安组	2.08	0.024	岩屑石英细砂岩	17.522	0.019	—	0.008	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A025	延安组	5.37	0.003	长石岩屑粗砂岩	4.572	0.042	0.018	0.023	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A030	延安组	9.94	0.053	长石石英细砂岩	8.649	0.025	0.019	0.013	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A031	延安组	7.40	0.040	长石细砂岩夹薄层泥岩	7.816	0.030	0.029	0.013	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A033	延安组	9.88	0.021	长石细砂岩夹粉砂质泥岩	5.332	0.036	0.027	0.019	—	—	IV类
ZL-10	JC2021116A034	延安组	4.61	0.009	泥质粉砂岩	7.872	0.028	—	0.014	—	—	IV类
JY820-02b	JC2021116A046	延安组	11.93	0.056	粉砂岩	5.748	0.033	0.026	0.017	—	—	IV类
JY820-02b	JC2021116A048	延安组	13.32	0.004	长石细砂岩	9.643	0.028	0.029	0.011	—	—	IV类
JY820-02b	JC2021116A049	延安组	9.09	0.007	长石细砂岩	4.913	0.037	0.031	0.018	—	—	IV类
JY820-02b	JC2021116A050	延安组	6.99	0.025	粉砂岩	4.681	0.038	0.021	0.022	—	—	IV类

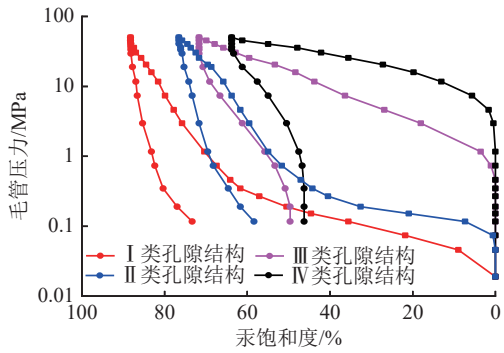
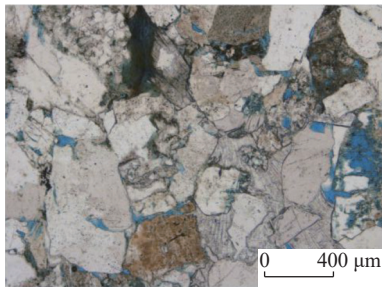
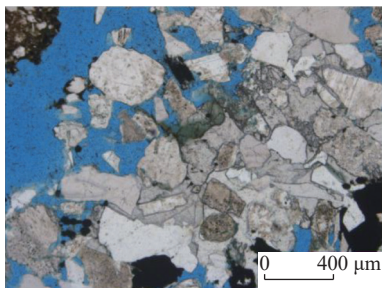


图6 直罗组与延安组典型毛管压力曲线特征及孔隙类型划分

Fig.6 Typical capillary pressure curves and pore types of Zhiluo and Yan'an Formation



(a) YP11, 直罗组, 长石粗砂岩



(b) YP44, 延安组, 岩屑长石中粒砂岩

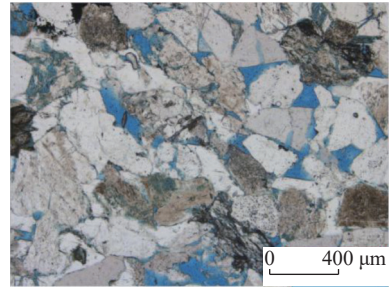
图7 I类孔隙结构类型岩样铸体薄片图像

Fig.7 Casting thin section of type I pore structure rock samples

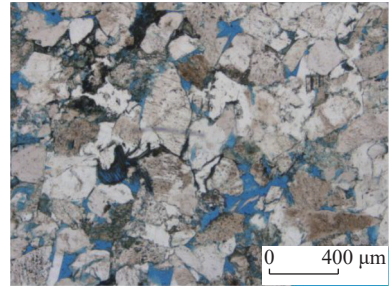
粒、粉粒砂岩, 孔隙组合类型较 I、II、III 类增加了杂基溶孔; T_2 谱峰的位置最靠前, 孔径小。该类孔隙结构的岩层渗透率平均值为 $0.029 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 平均孔隙率 6.30%, 表明岩石的孔渗特性差。

4 侏罗系砂岩宏观-微观特征与富水性的响应机制

影响含水层富水性的因素众多, 沉积相是含水层富水性大小的宏观表征, 微观孔隙结构是含水层富水性大小的微观表征。综合《煤矿防治水细则》(2018年)附录一含水层富水性的等级标准划分标准与研究区实际情况, 按照钻孔单位涌水量 q 大小将含水层富水性划分为五级, 极弱富水性($q \leq 0.01 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$)、



(a) YP-17, 直罗组, 长石粗砂岩



(b) YP-47, 延安组, 长石中粒砂岩

图8 II类孔隙结构岩样铸体薄片图像

Fig.8 Casting thin section of type II pore structure rock samples

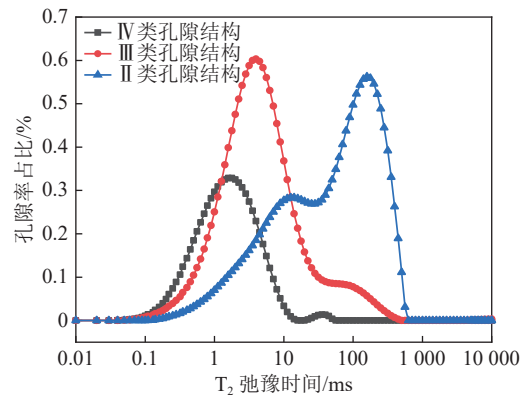


图9 直罗组与延安组核磁共振典型 T_2 谱分布特征及孔隙类型划分

Fig.9 Typical T_2 spectrum distribution of nuclear magnetic resonance and pore types of Zhiluo and Yan'an Formation

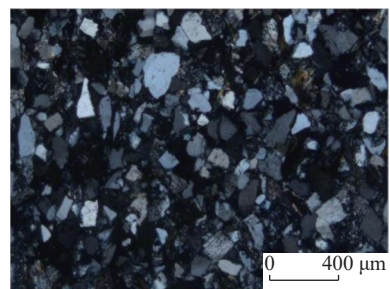


图10 III类孔隙结构岩样铸体薄片图像(YP-40, 延安组, 长石细砂岩)

Fig.10 Casting thin section of type III pore structure rock samples

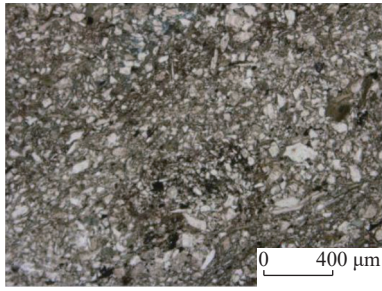


图 11 IV类孔隙结构岩样铸体薄片图像
(YP-46,延安组,粉砂岩)

Fig.11 Casting thin section of type IV pore structure
rock samples

弱富水性 ($0.01 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}) < q \leq 0.1 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)、中等富水性 ($0.1 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}) < q \leq 1.0 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)、强富水性 ($1.0 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}) < q \leq 5.0 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)、极强富水性 ($q > 5.0 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)。

4.1 侏罗系砂岩沉积相与富水性的关系

影响研究区煤层顶板含水层富水性的因素众多,其中,沉积(微)相类型及其展布规律决定了煤层顶板含、隔水层的发育程度与空间配置样式,成为地下水富集和水循环条件的重要控制因素。

通过对比沉积相类型与钻孔单位涌水量大小,

研究侏罗系砂岩宏观特征与含水层富水性的关系,见表 5。

由表 5、图 2、图 3 可知,沉积体系相同,河道砂坝沉积微相较河漫滩沉积微相富水性强,分流河道沉积微相较分流间湾沉积微相富水性强,河道砂坝岩性以粗砂岩、中砂岩为主,河漫滩岩性以中砂岩、细砂岩为主,且河道砂坝砂地比较河漫滩砂地比大,分流河道砂岩厚度、砂地比较分流间湾砂岩厚度、砂地比大。例如,ZL-6 与 P25 钻孔中均为河流沉积体系,沉积微相前者为河道砂坝,后者为河漫滩,前者砂地比(ZL-6 钻孔砂地比为 0.635)大于后者(P25 钻孔砂地比为 0.401),富水性前者(钻孔单位涌水量为 $0.2710 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)大于后者(钻孔单位涌水量为 0.0733),前者岩性主要为粗砂岩、中砂岩、细砂岩,后者岩性主要为中砂岩;ZK30-11 与 ZK33-17 钻孔中均为三角洲沉积体系,沉积微相前者为分流间湾,后者为分流河道,前者砂岩厚度、砂地比(ZK30-11 钻孔砂岩厚度为 17.69 m 、砂地比为 0.337)小于后者(ZK33-17 钻孔砂岩厚度为 95.47 m 、砂地比为 0.698),富水性前者(钻孔单位涌水量为 $0.0095 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)小于后者(钻孔单位涌水量为 $0.0580 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)。

表 5 研究区主要含水层沉积相与单位涌水量

Table 5 Sedimentary facies and drilling units-inflow statistics of main aquifers in the study area

序号	钻孔号	沉积体系	沉积微相	岩性	厚度/m	岩性占比/%	砂地比%	抽水层段	钻孔单位涌水量/ $(\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$
1	ZL-6	河流	河道砂坝	粗砂岩	42.3	35.93	0.635	直罗组	0.2710
				中砂岩	37.64	31.98			
				细砂岩	37.78	32.09			
2	P25	河流	河漫滩	粗砂岩	6.66	10.28	0.401	直罗组	0.0733
				中砂岩	53.37	82.37			
				细砂岩	4.76	7.35			
3	ZK30-11	三角洲	分流间湾	中砂岩	12.19	68.91	0.337	延安组	0.0095
				细砂岩	5.50	31.09			
4	ZK33-17	三角洲	分流河道	中砂岩	36.51	38.24	0.698	延安组	0.0580
				细砂岩	58.96	61.76			

沉积体系不同,河流沉积体系沉积微相普遍较三角洲沉积体系沉积微相富水性强。例如,ZL-6、P25 钻孔为河流沉积体系,钻孔单位涌水量为 $0.0733 \sim 0.2710 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,富水性为弱—中等,ZK30-11、ZK33-17 钻孔为三角洲沉积体系,钻孔单位涌水量为 $0.0095 \sim 0.0580 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,富水性为极弱—弱,河流沉积体系富水性较三角洲沉积体系富水性强。

4.2 侏罗系砂岩微观孔隙结构与富水性的关系

联合典型岩样铸体薄片、压汞、核磁共振等微观

孔隙结构试验测试成果与钻孔单位涌水量,探究侏罗系砂岩微观特征与富水性的关系,见表 6。

由表 6 可知,砂岩微观孔隙结构分类级别越低,粒度越粗,含水层富水性越强。相同地层时代的 JC2021116A064 样品与 JC2021116A010 样品,前者微观孔隙结构分类级别(微观孔隙结构类型属 II 类)低于后者(微观孔隙结构类型属 IV 类),前者为长石细砂岩,后者为含泥质粉砂长石细砂岩,前者富水性(钻孔单位涌水量 $q=0.0417 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)较后者富水性

表6 研究区主要含水层孔隙结构分类与钻孔单位涌水量

Table 6 Classification of pore structure and units-inflow of drilling for the main aquifer in study area

岩样编号	试验编号	地层时代	岩石定名	孔隙结构分类	孔隙率/%	渗透率/ 10^{-15} m^2	钻孔单位涌水量/($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	钻孔编号
YS1-2(1-2)8-A	JC2021116A064	直罗组	长石细砂岩	Ⅱ类	17.21	16.500	0.041 7	ZL-9
YS8-4(8-2)2-B	JC2021116A066	延安组	长石细砂岩	Ⅲ类	16.68	0.240	0.001 2	ZK27-15
ZL-10	JC2021116A010	直罗组	含泥质粉砂长石细砂岩	Ⅳ类	7.45	0.021	0.011 7	ZL-10

(钻孔单位涌水量 $q=0.0117 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)强,主要原因是前者砂岩孔隙率、渗透率(孔隙率为 17.21%,渗透率为 $16.500\times 10^{-15} \text{ m}^2$)较后者(孔隙率为 7.45%,渗透率为 $0.021\times 10^{-15} \text{ m}^2$)大,前者粒径(最大粒径 0.35 mm,主要粒径 0.07~0.25 mm)较后者(最大粒径 0.29 mm,主要粒径 0.04~0.20 mm)大,前者胶结(胶结类型为孔隙式胶结,填隙物含量为 12%,颗粒之间为点-线接触)较后者(胶结类型为孔隙式胶结,填隙物含量为 18%,颗粒之间为点接触)差。不同地层时代的 JC2021116A064 样品与 JC2021116A066 样品,前者微观孔隙结构分类级别(微观孔隙结构类型属Ⅱ类)低于后者(微观孔隙结构类型属Ⅲ类),前者富水性(钻孔单位涌水量 $q=0.0417 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)较后者富水性(钻孔单位涌水量 $q=0.0012 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)强,主要原因是前者砂岩孔隙率、渗透率(孔隙率为 17.21%,渗透率为 $16.500\times 10^{-15} \text{ m}^2$)较后者(孔隙率为 16.68%,渗透率为 $0.240\times 10^{-15} \text{ m}^2$)大,前者最大粒径与后者接近,依次为 0.35、0.41 mm,前者主要粒径较后者大,依次为 0.07~0.25 mm、0.05~0.21 mm,两者胶结程度接近,孔隙式胶结,填隙物含量为 12%~15%,颗粒之间为点-线接触。

4.3 侏罗系砂岩宏观-微观特征与富水性响应机制

不同的沉积相(沉积微相)由不同岩性及其组合的岩层经沉积作用形成,不同岩性及其组合岩层具有不同的微观孔隙、喉道大小及其连通性,也即微观孔隙结构类型不同,侏罗系地层砂岩粒度大小、排列组合等影响砂岩孔隙中地下水的流通与富集,例如,由于胶结作用使得岩体孔隙结构复杂化,颗粒大的组分含量与地下水流通性、地下水储存量并非成正比,砂岩地层中颗粒大的组分越多,孔隙率可能降低,主要原因是死端孔隙的增加降低了地下水的流通性,从而影响含水层的富水性。

研究区直罗组地层河道砂坝相较河漫滩沉积微相富水性强,孔隙率、渗透率大,前者砂岩岩性主要为粗粒度的粗砂岩、中砂岩,后者岩性主要为中砂岩、细砂岩,前者岩石粒径较后者粒径大,微观孔隙结构分类级别较低。例如,直罗组河道砂坝沉积微相钻

孔 ZL-9(图 2,表 4 岩样 JC2021116A064)较河漫滩沉积微相钻孔 ZL-10(图 2,表 4 岩样 JC2021116A010)的孔隙率、渗透率大,富水性强,前者孔隙率 17.21%,渗透率 $16.500\times 10^{-15} \text{ m}^2$,后者孔隙率 7.45%,渗透率 $0.021\times 10^{-15} \text{ m}^2$,原因在于前者为长石细砂岩,后者为含泥质粉砂长石细砂岩(表 6),前者微观孔隙结构分类级别(Ⅱ类,表 6 岩样 JC2021116A064)低于后者(Ⅳ类,表 6 岩样 JC2021116A010),前者富水性(钻孔单位涌水量 $q=0.0417 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)较后者富水性(钻孔单位涌水量 $q=0.0117 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$)强。

综上所述,岩石骨架、空隙(孔隙)、水构成了含水层地层,成份、结构相同的沉积物在一定沉积环境中经沉积作用形成岩石组合,在不同的沉积环境条件下形成不同的沉积相,其砂岩岩性、岩石组合不同,富水性不同,即沉积相是富水性的宏观表征;砂岩岩性及其组合与孔隙结构决定了孔喉及其连通性,通过岩石粒度大小、岩石骨架排列组合、孔喉分布及其连通性等综合反映含水层富水性,即岩石孔隙结构是富水性的微观表征。岩石宏观沉积相、微观孔隙结构相互作用、相互联系,形成有机统一体,共同表征富水性。

5 结 论

1) 陕北侏罗系砂岩富水性差异大,通过沉积相划分、砂岩微观孔隙结构测试研究砂岩宏观沉积与微观孔隙结构特征,联合钻孔抽水试验单位涌水量,揭示了直罗组、延安组砂岩含水层沉积相、微观孔隙结构与富水性的响应机制,能够为砂岩含水层富水性预测与矿井水岩防治提供理论依据。

2) 通过沉积相划分可知,大海则煤矿直罗组下段主要发育河流沉积体系,河流砂坝和河漫滩沉积微相,延安组三段主要发育三角洲沉积体系,分流河道和分流间湾沉积微相;对比钻孔单位涌水量认为,河流沉积体系普遍较三角洲沉积体系含水层富水性强,以粗砂岩、中砂岩为主的河道砂坝富水性相较以中砂岩、细砂岩为主的河漫滩富水性强,砂岩厚度、砂地比较大的分流河道较砂岩厚度、砂地比较小的

分流间湾富水性大。

3) 采用铸体薄片图像分析、压汞、核磁共振等试验测试技术对大海则煤矿 38 块不同岩性的岩样进行微观孔隙结构特征研究, 将砂岩微观孔隙结构类型划分为大孔粗喉型(I 类)、中孔-中-细喉型(II 类)、小孔细喉型(III 类)、小-微孔-微细喉型(IV 类) 等四种类型, 从 I 类到 IV 类, 孔隙结构依次变差, 含水层富水性依次增强, 粒度依次变粗。

4) 综合大海则煤矿侏罗系地层宏观沉积特征、砂岩微观孔隙结构与钻孔抽水试验单位涌水量成果认为, 河道砂坝较河漫滩富水性强、微观孔隙结构分类级别低、孔隙率与渗透率大、砂岩粒径大; 岩石宏观沉积特征、微观孔隙结构相互作用、相互联系, 形成有机统一体, 共同表征富水性。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 孙 强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(4): 043531.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, *et al.* Scientific issues of coal detraction mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of Western China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(4): 043531.
- [2] 董书宁, 姬亚东, 王 皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, *et al.* Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [3] 冯 洁, 侯恩科, 王苏健, 等. 陕北侏罗系砂岩沉积控水规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 546-556.
FENG Jie, HOU Enke, WANG Sujian, *et al.* The law of sedimentary water control of Jurassic system in northern Shaanxi Province[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(3): 546-556.
- [4] 曾一凡, 孟世豪, 吕 扬, 等. 基于矿井安全与生态水资源保护等多目标约束的超前疏放水技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3091-3100.
ZENG Yifan, MENG Shihao, LYU Yang, *et al.* Advanced drainage technology based on multi-objective constraint of mine safety and water resources protection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3091-3100.
- [5] 武 强, 王 洋, 赵德康, 等. 基于沉积特征的松散含水层富水性评价方法与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 460-466.
WU Qiang, WANG Yang, ZHAO Dekang, *et al.* Water abundance assessment method and application of loose aquifer based on sedimentary characteristics[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(3): 460-466.
- [6] 武 强, 许 珂, 张 维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1341-1347.
WU Qiang, XU Ke, ZHANG Wei. Further research on "three maps-two predictions" method for prediction on coal seam roof water bursting risk[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1341-1347.
- [7] 侯恩科, 童仁剑, 王苏健, 等. 陕北侏罗纪煤田风化基岩富水性 Fisher 模型预测方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2312-2318.
HOU Enke, TONG Renjian, WANG Sujian, *et al.* Prediction method for the water enrichment of weathered bedrock based on Fisher model in Northern Shaanxi Jurassic coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2312-2318.
- [8] 代革联, 杨 韬, 周 英, 等. 神府矿区柠条塔井田直罗组地层富水性研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 144-147.
DAI Gelian, YANG Tao, ZHOU Ying, *et al.* Exploration of the water-abundant sandstone geological features of Ningtiaota Ida Nao Luo in Shenfu mining area[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(4): 144-147.
- [9] 曾一凡, 武 强, 杜 鑫, 等. 再论含水层富水性评价的“富水性指数法”[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2423-2431.
ZENG Yifan, WU Qiang, DU Xin, *et al.* Further research on "water-richness index method" for evaluation of aquifer water abundance[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2423-2431.
- [10] 王 洋, 武 强, 丁 湘, 等. 深埋侏罗系煤层顶板水害源头防控关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2449-2459.
WANG Yang, WU Qiang, DING Xiang, *et al.* Key technologies for prevention and control of roof water disaster at sources in deep Jurassic seams[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2449-2459.
- [11] 郭小铭, 王 皓, 周麟晨. 煤层顶板巨厚基岩含水层空间富水性评价[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 167-175.
GUO Xiaoming, WANG Hao, ZHOU Linsheng. Evaluation of spatial water enrichment of ultra-thick bedrock aquifer in coal seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 167-175.
- [12] 郭继亮, 李宏兵, 张 研, 等. 受孔隙形态影响的碳酸盐岩孔隙率反演[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 146-151.
GUO Jiliang, LI Hongbing, ZHANG Yan, *et al.* Inverting carbonate reservoir porosity affected by pore aspect ratio[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 146-151.
- [13] 蒋明镜, 胡海军, 彭建兵, 等. 地裂缝区黄土和充填土持水曲线的测试与计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1795-1801.
JIANG Mingjing, HU Haijun, PENG Jianbing, *et al.* Measurement and calculation of water retention curves of loess and filling about ground fissure[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(12): 1795-1801.
- [14] 侯晓坤, 李同录, 谢 萧, 等. 甘肃Q₃原状黄土的微观结构对其土-水特征曲线的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1307-1314.
HOU Xiaokun, LI Tonglu, XIE Xiao, *et al.* Effect of undisturbed Q₃ loess's microstructure on its SWCC[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1307-1314.
- [15] 宋 磊, 宁正福, 孙一丹, 等. 联合压汞法表征致密油储层孔隙

- 结构联合压汞法表征致密油储层孔隙结构[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 700-705.
- SONG Lei, NING Zhengfu, SUN Yidan, *et al.* Pore structure characterization of tight oil reservoirs by a combined mercury method[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(5): 700-705.
- [16] 喻建, 马捷, 路俊刚, 等. 压汞—恒速压汞在致密储层微观孔喉结构定量表征中的应用: 以鄂尔多斯盆地华池—合水地区长7储层为例[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(6): 789-795.
- YU Jian, MA Jie, LU Jungang, *et al.* Application of mercury injection and rate-controlled mercury penetration in quantitative characterization of microscopic pore structure of tight reservoirs: A case study of the Chang 7 reservoir in Huachi-Heshui area, the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2015, 37(6): 789-795.
- [17] 何顺利, 焦春艳, 王建国, 等. 恒速压汞与常规压汞的异同[J]. *断块油气田*, 2011, 18(2): 235-237.
- HE Shunli, JIAO Chunyan, WANG Jianguo, *et al.* Discussion on the differences between constant-speed mercury injection and conventional mercury injection techniques[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2011, 18(2): 235-237.
- [18] 杨涛, 谢俊, 周巨标, 等. 低孔-特低渗砂岩储层可动流体核磁共振特征及成因: 以王龙庄油田T89断块阜宁组二亚段为例[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(1): 119-126.
- YANG Tao, XIE Jun, ZHOU Jubiao, *et al.* NMR features and contributing factors of movable fluid in low porosity and ultra-low permeability sandstone reservoir: Taking the 2nd member of Funing Formation in T89 Block of Wanglongzhuang Oilfield as an example[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2018, 37(1): 119-126.
- [19] 公言杰, 柳少波, 赵孟军, 等. 核磁共振与高压压汞实验联合表征致密油储层微观孔喉分布特征[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(3): 389-394.
- GONG Yanjie, LIU Shaobo, ZHAO Mengjun, *et al.* Characterization of micro pore throat radius distribution in tight oil reservoirs by NMR and high pressure mercury injection[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(3): 389-394.
- [20] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔喉结构[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 961-970.
- XIAO Dianshi, LU Shuangfang, LU Zhengyuan, *et al.* Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 961-970.
- [21] 杜相仪, 董少群, 曾联波, 等. 碳酸盐岩铸体薄片面孔自动提取研究[J]. *地质论评*, 2021, 67(6): 1910-1921.
- DU Xiangyi, DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, *et al.* Study of automatic extraction porosity using cast thin sections for carbonates[J]. *Geological Review*, 2021, 67(6): 1910-1921.
- [22] 吴松涛, 朱如凯, 李勋, 等. 致密储层孔隙结构表征技术有效性评价与应用[J]. *地学前缘*, 2018, 25(2): 191-203.
- WU Songtao, ZHU Rukai, LI Xun, *et al.* Evaluation and application of porous structure characterization technologies in unconventional tight reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 191-203.
- [23] 储小送, 屈争辉, 郭志军, 等. 碎粉煤中孔隙特性及对冰冻响应试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(9): 117-121.
- CHU Xiaosong, QU Zhenghui, GUO Zhijun, *et al.* Study on fine coal porosity features and response to seam freezing[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(9): 117-121.
- [24] 冯洁, 侯恩科, 王苏健, 等. 陕北侏罗系沉积控水规律与沉积控水模式研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1614-1629.
- FENG Jie, HOU Enke, WANG Sujian, *et al.* The law of sedimentary water control of Jurassic System in Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1614-1629.
- [25] 王苏健, 冯洁, 侯恩科, 等. 柠条塔井田砂岩微观孔隙结构类型及其对含水层富水性的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3236-3244.
- WANG Sujian, FENG Jie, HOU Enke, *et al.* Microscopic pore structure types of sandstone and its effects on aquifer water abundance: Taking in Ningtiaota Coal Mine as an example[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3236-3244.
- [26] 李雄炎, 秦瑞宝, 曹景记, 等. 复杂储层连通孔隙率评价与渗透率定量计算方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(2): 377-385, 245.
- LI Xiongyan, QIN Ruibao, CAO Jingji, *et al.* Method of connected porosity evaluation and quantitative permeability calculation for complex reservoirs[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(2): 377-385, 245.